中国科学: 地球科学　2015 年　第 45 卷　第 10 期: 1569 ~ 1574
www.scichina.com　earth.scichina.com



chinaXiv:201605.01693v1

论 文

日全食期间武汉钠层和电离层联合观测结果

程学武[①*], 杨勇[①], 王泽龙[②④], 李发泉[①], 杨国韬[②], 赵正予[③], 龚威[③], 王继红[②], 胡雄[②], 林鑫[①④], 吴小成[②], 宋沙磊[①], 龚顺生[①]

① 中国科学院武汉物理与数学研究所, 波谱与原子分子物理国家重点实验室, 武汉 430071;
② 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190;
③ 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079;
④ 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049
* E-mail: lidar@wipm.ac.cn

收稿日期: 2015-02-15; 接受日期: 2015-04-08; 网络版发表日期: 2015-09-16
国家自然科学基金项目(批准号: 10978003, 41104101, 41101334)和国家高技术研究发展计划资助

摘要　利用全天时钠层荧光激光雷达和 GPS 电离层探测仪, 在 2009 年 7 月 22 日武汉日全食期间, 开展钠层与电离层的联合观测试验. 观测结果表明, 钠层密度半高全宽在日全食过程中稍有变窄, 而日全食过后增宽, 钠层峰值高度在日全食过程中稍有降低, 日全食过后高度略增, 钠层变化特性表现出快速的日出日落过程. 电离层电子总含量和天空背景光噪声也随日全食期间太阳辐照的变化而呈现出明显下降和上升的波动特征. 所不同的是, 钠层原子的这种半宽度起伏变化要比电离层的变化迟缓得多, 这可能是由于钠层受到日全食辐照扰动后, 会产生一系列复杂的光化学反应及动力输运过程, 再复合成钠原子被激光雷达探测到, 有一个滞后过程, 这也正好与理论模拟的结果相符.

关键词
日全食
激光雷达
钠层
电离层
TEC

日食是当太阳、月球和地球三者运动呈一直线时, 太阳光被月球遮挡而不能到达地球表面所形成的一种难得的天然现象. 当日食发生时, 地球表面辐射剧烈减少, 造成地表温度降低、湿度增加、大气能见度降低等等现象(Founda等, 2007; Sharma等, 2010), 同时, 也会引发地球电离层的一系列物理化学现象, 进而影响通信、导航等(Le等, 2008; Muller-Wodarg等, 1998; 舒逢春等, 2009).

利用激光雷达的高时间、高空间分辨率和高探测灵敏度等优势, 可以获得日全食期间更精确的大气变化信息. 例如, 利用30 km以下低空气溶胶激光雷达, 观测到日全食期间行星际边界层高度降低、臭氧含量减少等现象(Pershin等, 2008; Amiridis等, 2007). 然而, 到目前为止, 国际上尚未见有利用全天时钠层荧光激光雷达研究80~110 km钠层对日全食的响应的报道.

2009年7月22日中国发生了本世纪持续时间最长的一次日食, 武汉正好位于日全食中心地带, 食甚时间长达5min之久. 借此机会, 利用全天时钠层荧光激光雷达、GPS电离层探测仪等观测手段同时联合探测, 探索地球钠层和电离层对日全食响应的高时空分辨观测, 为研究地球大气光化学、大气动力学以及热力学

中文引用格式: 程学武, 杨勇, 王泽龙, 李发泉, 杨国韬, 赵正予, 龚威, 王继红, 胡雄, 林鑫, 吴小成, 宋沙磊, 龚顺生. 2015. 日全食期间武汉钠层和电离层联合观测结果. 中国科学: 地球科学, 45: 1569–1574
英文引用格式: Cheng X W, Yang Y, Wang Z L, Li F Q, Yang G T, Zhao Z Y, Gong W, Wang J H, Hu X, Lin X, Wu X C, Song S L, Gong S S. 2015. Joint observation results of Na layer and ionosphere in Wuhan during the Total Solar Eclipse. Science China: Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-015-5126-2

等过程起到重要作用, 同时也为中国大气科学和空间环境预报提供宝贵的科学探测数据和观测研究结果.

1　观测设备

为了获得日全食期间的钠层演化过程, 采用了全天时钠层荧光激光雷达, 可获得钠层的原子数密度、波动等信息; 为了获得日全食期间电离层的发展过程, 采用了GPS电离层探测仪, 可获得电子浓度、电子总含量等信息. 这两种探测手段, 是目前研究金属层钠层和电离层对太阳辐射的响应研究的有利手段, 仪器设备简述如下:

1.1　全天时钠层荧光激光雷达

中国科学院武汉物理与数学研究所研制成功一台全天时钠层荧光激光雷达(程学武等, 2007), 该激光雷达由激光发射系统、光学接收系统和检测控制系统三部分组成. 其工作原理是, 在激光发射系统中, 大功率Nd:YAG激光器泵浦Sirah染料激光器, 产生大功率589 nm脉冲激光, 经钠原子稳频后, 竖直发送出去, 用于激发钠层荧光. 光学接收系统采用直径40 mm的折射式望远镜, 经光纤和准直后, 由原子滤光器滤除白天强烈天空背景光干扰后, 送入高灵敏光电倍增管H7421-40. 检测控制系统中的MCS-PCI多通道光子计数卡获取光电倍增管的电子信号, 经数据反演处理, 即可获得全天时钠层的原子数密度、波动等信息.

全天时钠层荧光激光雷达主要参数如表1所示. 该激光雷达的特色在于: 发射激光系统中采用智能原子稳频技术, 将发射激光波长锁定在钠原子D2(589.158nm)共振跃迁谱线上, 高效率激发高空钠层的共振荧光; 在光学接收系统中采用超窄带宽、超高稳定性的钠原子滤光器, 可有效滤除白天天空背景光噪声(Fricke等, 2002), 实现对钠层(80~110 km)和部分中层大气(5~50 km)的全天时(24 h不间断)观测, 为了解钠层的昼夜变化、潮汐波过程等中长尺度的观测和研究提供了有利手段.

1.2　电离层探测的 GPS 接收系统

GPS用于电离层观测研究, 具有观测数据质量好、可多点布站观测等特点, 其应用也越来越广泛. GPS电离层探测主要由GPS卫星、GPS接收机、数据处理软件三部分组成. 其工作原理是: GPS接收机定时自动同时获取所有通道的GPS卫星信号, 测量出两个频率的伪码和载波相位时延, 并解码GPS星历信息. 从伪码时延和载波相位时延两种观测数据中计算出相应的两种斜向TEC(电离层电子总含量). 从GPS星历信息中计算每一次观测所对应的各通道卫星视线的仰角、方位角, 再通过数据反演处理, 即可获得TEC数据, 并生成TEC地图.

表 1　全天时钠层荧光激光雷达(WIPM Lidar)主要参数

参数	数值
激光波长(nm)	589.158
激光能量(mJ)	~40
重复频率(Hz)	30
激光线宽(GHz)	~1.6
望远镜口径(m)	Φ0.4
望远镜焦距(m)	1.5
滤光带宽(nm)	~0.002
探测方式	光子计数

在本次观测所用GPS接收机为加拿大NovAtel公司生产的DL-V3三频GPS高性能接收器(详细技术参数可参阅www.novatel.com官方网站提供的说明书). 从GPS接收机获得的回波信号, 经最小二乘法解, 算出TEC, 从而获得电磁波通过高空电离层时, 沿传播路径上单位截面柱体内的电子总数, 反映出电离层随时间变化的信息.

2　观测结果

2009年7月22日日全食是21世纪以来最大的一次日全食, 武汉地处30.59°N和114.29°E, 正好位于本次日全食带的中部, 食甚观测时间长达5 min以上. 武汉地区日出时间05:34 (21:34 UTC), 日全食开始的时间为08:14 (00:14 UTC), 食甚的时间为09:26 (01:26 UTC), 全食结束时间为10:46 (02:46 UTC). 此次联合观测, 我们获得了不少有意义的观测结果, 分述如下.

2.1　钠层与电离层对太阳辐射的响应

激光雷达原始回波信号经过本底噪声扣除、能量归一化、高度平方修正等处理后, 可获得80~110 km高空钠层原子数密度. 2009年7月22日武汉日全食期间, 利用全天时钠层荧光激光雷达, 获得了钠层原子数密度的时空演化图, 如图1(a)所示. 图中纵坐标是高度, 横坐标是当地时间, 每条廓线的时间分辨率约

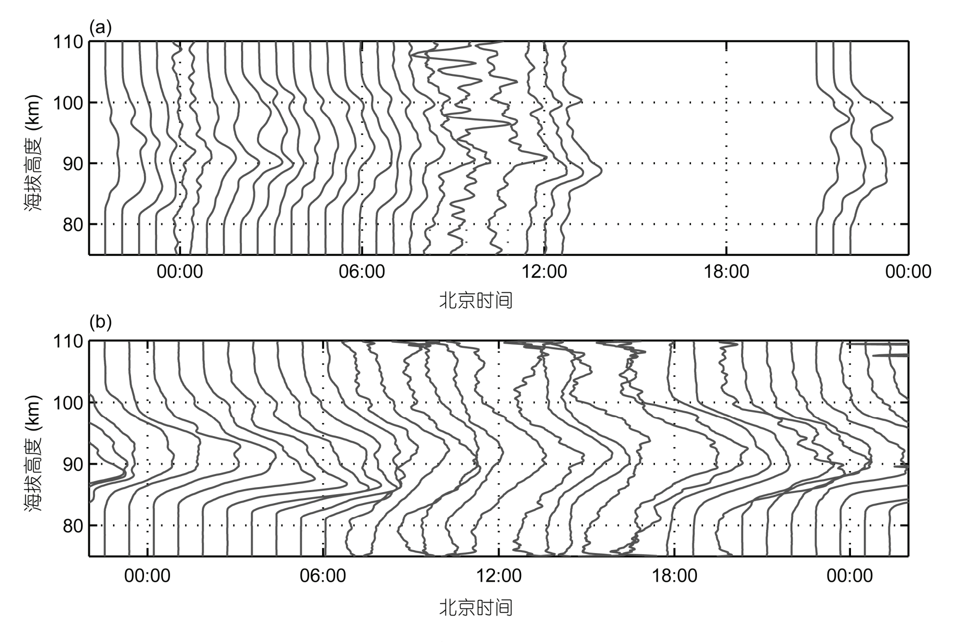


图 1　钠层的时空演化

(a) 2009 年 7 月 22 日日全食期间; (b) 2009 年 11 月 3 日

30 min, 空间分辨率约500 m. 观测时间从2009年7月21日21点(13:34 UTC)到22日22点. 图中三条蓝色短划线为日全食的开始、食甚和结束时间.

从钠层原子数密度的时空演化图中可以看出, 钠层密度半高全宽在约凌晨4点(北京时间)最窄, 半高宽约为12.48 km, 到早上7点后变宽, 半高宽约16.32 km; 日全食过后11:30左右, 钠层继续增宽, 达到大约17.08 km宽度, 到21点左右, 钠层变窄到16.12 km. 为了便于比较, 图1(b)给出了一次正常的钠层昼夜演化图, 钠层宽度受太阳光调制明显, 特别是在早晨增加较快, 而上午或者中午增加不大, 傍晚左右开始下降, 这些现象和国外报道的钠层昼夜变化规律基本一致(Robert等, 1999). 此次日全食期间, 太阳短暂的遮挡与快速出现, 我们同样也观测到了类似的现象, 日全食期间钠层宽度变窄, 日全食过后钠层宽度有明显增宽的趋势.

针对图1中几个钠层峰的中心峰值高度随时间变化, 做峰值高度变化图形如图2所示. 图中三种不同形状的块状图代表不同高度峰值随时间的变化, 三个峰值高度分别约为102, 95和90 km. 从图2中可以看出, 夜间钠层峰值高度明显降低, 但在凌晨太阳升起的时候, 钠层峰值高度抬高. 此次日全食期间, 同样也有类似白天黑夜的效果, 日全食刚开始发生期

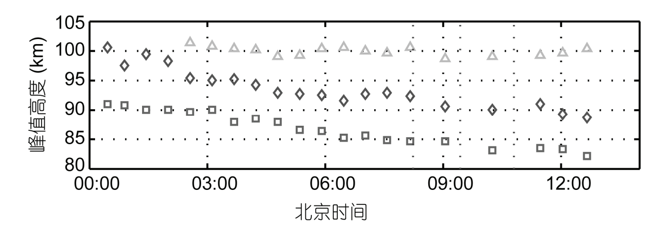


图 2　日全食期间钠层峰值随时间变化

间, 钠层峰值高度升高, 日全食结束后, 钠层峰值高度降低. 且最上面100 km左右峰值随太阳日出日落的变化最明显, 95 km左右的钠层峰值次之, 90 km以下钠层峰值影响最小.

此外, 钠原子柱密度的变化如图3所示. 钠层柱密度在早上太阳出来和日全食过后都出现了柱密度增加的现象, 而柱密度在夜间通常是随时间降低的. 日全食过后, 钠层柱含量整体有明显的下降, 这与徐寄遥等人(Xu和Smith, 2004)的数值模拟相吻合, 理论分析表明, 一旦钠层受到扰动后, 即便恢复到原来状态, 钠层的变化还会持续相当长的时间. 此外, 图中凌晨2点左右出现了明显的钠层增强现象, 与此同时, 武汉大学的赵正予教授等人也观测到了此时电离层异常现象(Chen等, 2010), 表明钠层与电离层之间具有密切的相互耦合关系.

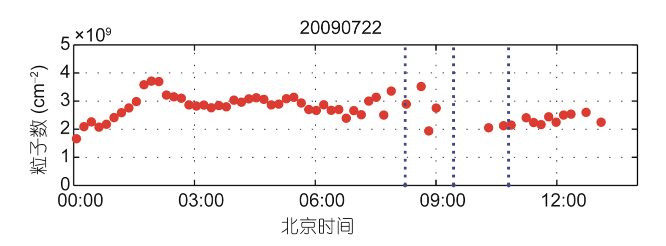


图 3　日全食期间钠层柱密度变化

2.2　天空背景光噪声与电子总含量变化

通过读取全天时钠层荧光激光雷达回波中本底噪声信息, 可获得此次日全食期间天空背景光噪声强度随时间的变化过程, 如图4所示. 图中纵坐标代表背景光噪声光子计数强度, 横坐标代表当地时间. 图中三条红色虚线同样代表初亏、食甚、复圆. 从图中可以看出, 本底噪声最低处在凌晨3~4点左右,等效噪声~0.4个光子, 噪声最高处在中午11~13点左右, 此时太阳高度角最大, 等效噪声在20000个光子左右. 在日全食食甚时刻, 背景光噪声~7个, 相当于当地时间清晨5:30分左右太阳刚刚升起时刻的天空背景光噪声大小.

从GPS电离层探测仪获得的电离层电子总含量(TEC)(如图5所示)相比可见, 电离辐射强度与电离层所受光照密切相关, 电子总含量会随着太阳光照强度的变化而变化. 图中三条蓝色虚线分别表示日全食开始、食甚、日全食结束, 可以看出, 食甚时, TEC有明显下降特征, 并且与日全食发生的时间对应较好, 而在其它阶段没有这种变化特征, 表明日全食期间对电离层电子总含量有明显影响.

由此可见, 日全食期间的太阳遮挡对电离层电子总含量以及天空背景光噪声的大小几乎是同步发生的, 没有太明显的时间滞后特性.

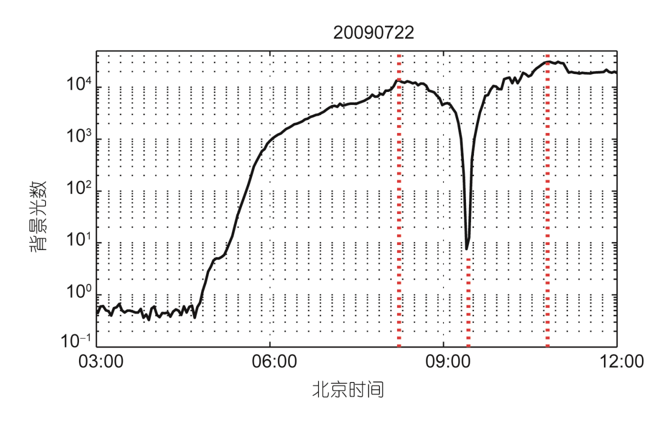


图 4　天空背景光噪声的演化

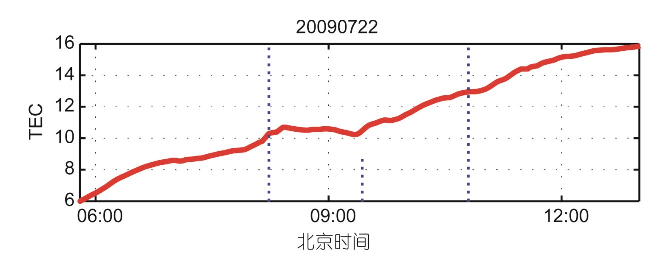


图 5　电离层电子总含量(TEC)的演化

2.3　Es 层临界频率的变化

正常情况下, Es几乎不会产生多普勒变化. 7月22日日全食当天, 观测到Es层不均匀体的漂移运动加剧, 如图6所示. 而由重力波引起的效应相对于食甚的发生时刻会有半小时左右的延迟, 而处理观测数据的获取时间为食甚前后半个小时, 可以推断多普勒效应并不是由于重力波引起的行波扰动造成的. 这些变化产生的原因即是由于日食时太阳辐射的减弱, 导致Es层电子浓度分布发生变化引起的, 引起不均匀体的漂移运动, 反映在探测图中多普勒变化. 在日全食期间Es层的临界频率迅速增加, 随后又发生剧烈抖动. 此现象表明Es层的电子浓度不断地发生强烈变化, 与图1(a)显示的钠层密度在日全食期间发生强烈扰动相关.

3　讨论

首次利用全天时钠层荧光激光雷达在日全食期间对钠层进行观测, 其结果显示钠层在日全食期间的变化特征与24 h昼夜变化特征相似. 对钠层来说, 在不考虑潮汐作用的情况下, 一次完整的日全食过程相当于经历了一次昼夜变化. 在钠层的底部(85 km以下), 钠原子的含量很大程度上受中性化学反应的影响. 其中钠原子主要经过如下化学反应生成相对稳定的碳酸氢钠(John, 1991):

$$Na+O_3 \rightarrow NaO+O_2 \tag{1}$$

$$NaO+H_2O \rightarrow NaOH+OH \tag{2}$$

$$NaOH+CO_2+M \rightarrow NaHCO_3+M \tag{3}$$

而少部分的碳酸氢钠又会释放出一定的钠原子:

$$NaHCO_3+H \rightarrow Na+H_2O+CO_2 \tag{4}$$

白天由于太阳辐射会导致大气成分发生变化, 进而会影响上述化学反应的结果. 例如O_3吸收紫外

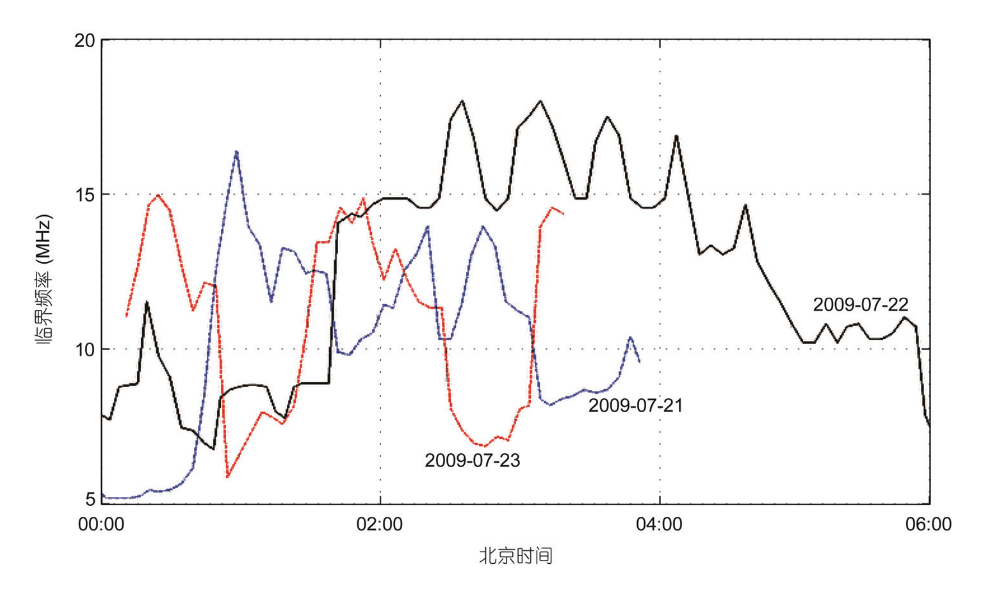


图 6 日全食当天和前后两天 Es 层临界频率的变化

线, 生成O和O_2:

$$O_3+hv \rightarrow O+O_2 \tag{5}$$

大气中O_3成分的减少会降低反应(1)的速率, 使消耗的钠原子减少, 同时经过反应(2)和(3)生成的$NaHCO_3$减少. 大气吸收太阳辐射使温度升高, 而反应(4)的化学反应速率随温度的升高而增大, 进而使生成的钠原子增多. 而另外一个光化学反应:

$$NaOH+hv \rightarrow Na+OH \tag{6}$$

不仅能够生成更多的钠原子, 还能够有效地降低反应(4)的速率. 所以光照可以使钠层底部的含量增加. 对于钠层的上部(95 km以上), 钠原子的密度主要受光化学反应的控制. 在日全食开始发生的时候, 随着光照强度的减弱, 电子交换反应逐渐起到主导作用, 使含钠离子簇与电子复合, 释放钠原子:

$$Na^++N_2+M \rightarrow NaN_2^++M \tag{7}$$

$$NaN_2^++X \rightarrow NaX^++N_2 \tag{8}$$

$$NaY^++e^- \rightarrow Na+Y \tag{9}$$

其中, X=CO_2, H_2O, O; Y=N_2, CO_2, H_2O, O. 进而使得钠原子的含量增加. 当日出时或者日全食的后期, 太阳辐射逐渐增大, 并且直接作用于钠层, 钠原子发生下面的光致电离反应:

$$Na+hv \rightarrow Na^++e^- \tag{10}$$

导致钠原子的密度迅速减小. 同时随着光照时间的加长, 电离层E层中的O_2^+和NO^+离子浓度的增大, 使钠原子与其发生的化学反应:

$$Na+O_2^+ \rightarrow Na^++O_2 \tag{11}$$

$$Na+NO^+ \rightarrow Na^++NO \tag{12}$$

反应速率增大, 进一步消耗钠原子, 将其转化为钠离子. 对于钠层顶部而言, 太阳辐射将更多的钠原子转化为钠离子, 对钠层形成了抑制作用.

无论是中性化学反应还是光化学反应, 钠原子与其化合物之间的转换都处于准动态平衡状态, 太阳辐射是打破动态平衡的因子, 使钠层形态在日全食期间发生了一定的扰动. 徐寄遥等人(Xu和Smith, 2003, 2005)采用特征值和特征向量的分析方法对钠层发生扰动之后的光化学时间常数做出了详细的计算和说明, 与传统的钠原子化学寿命不同. 在钠层的峰值附近, 化学时间常数较长, 可以长达数小时, 这是由于Na原子被O_3氧化为NaO, 随后NaO又迅速与O原子反应生成Na(2p, 2s). 而在钠层的底部和上部化学时间常数较短. 在日食期间, 一旦电离层的扰动使钠层的整体形态发生改变, 如图1(a)所示, 钠层整体形态的恢复则需要很长时间, 表现为柱含量维持较低水平(图3), 这与我们观测到的钠层形态对太阳光照强度的响应存在一定的滞后性相吻合. 在日出之后, 钠层的半高宽逐渐开始增加, 直到夜晚开始变窄. 这是由于白天随着温度的升高, 反应(4)的速率增大, 释放出更多的钠原子, 使钠层的下沿继续下探, 进而半高宽逐渐增加, 而在夜晚开始减小. 我们观测得到钠层的峰值密度和柱密度均在夜间减小, 而在日出或者日全食结束之后增加. 这是太阳辐射对钠层作用的结果, 同时也受到了电离层变化的影

响. 联合探测设备GPS电离层探测仪的测量结果反映了同时期的电离层电子总含量随太阳辐照的变化非常迅速, 说明太阳光照强度可以直接影响电离层的特性. 电离层受太阳辐射发生剧烈扰动, 可以通过反应(7)~(12)与钠层相互作用, 对钠层的顶部有较大影响, 而电离层与钠层之间的相互耦合机制仍然有许多问题需要讨论与解决.

4 结论

利用全天时钠层荧光激光雷达、GPS电离层探测等设备. 首次实现对2009年7月22日武汉日全食期间钠层和电离层的联合观测. 观测表明, 钠层峰值半高全宽随太阳光照强度的增加而增加, 随光照强度减小而降低, 钠层峰值高度先降低后抬高, 这两种规律的变化, 无论是正常的24h昼夜周期还是日全食期间, 都表现出了这一特征. 这是由钠原子与其他含钠成分之间所发生的中性化学反应和光化学反应共同作用的结果. 与钠层形态整体恢复速率相比, GPS电离层探测仪测量出的电子总含量对太阳辐照的响应要迅速得多, 当然, 太阳辐照导致的天空背景光噪声在日全食期间降低较大, 降低速度和日全食期间全日面望远镜观测到的太阳光球面积相关, 也与TEC下降趋势类似. 此次联合观测, 为日—地链观测研究地球对太阳的响应提供了有效探测数据和科学观测结果. 遗憾的是, 由于此次日全食期间有云, 因此无法对调制速率、调制幅度等特性进行精细研究, 为今后日全食期间的更精确观测提供参考和借鉴.

致谢 感谢中国科学院空间科学与应用研究中心龚建村研究员、刘四清研究员, 徐寄遥研究员, 感谢中国科技大学窦贤康教授, 他们对本工作观测和研究给予大力支持.

参考文献

程学武, 龚顺生, 李发泉, 等. 2007. 武汉高空钠层的激光雷达24 h连续观测. 中国科学G辑: 物理学 力学 天文学, 37: 196–201

舒逢春, 郭丽, 刘敏, 等. 2009. 基于VLBI和GPS测量2009年7月22日日全食期间电离层TEC变化. 科技导报, 27: 19–24

Amiridis V, Melas D, Balis D S, et al. 2007. Aerosol lidar observations and model calculations of the Planetary Boundary Layerevolution over Greece, during the March 2006 Total Solar Eclipse. Atmos Chem Phys, 7: 6181–6189

Chen G, Zhao Z, Yang G, et al. 2010. Enhancement and HF Dopplerobservations of sporadic-E during the solar eclipse of 22 July 2009. J Geophys Res, 115: A09325, doi: 10.1029/2010JA015530

Founda D, Melas D, Lykoudis S, et al. 2007. The effect of the total solareclipse of 29 March 2006 on meteorological variable sin Greece. Atmos Chem Phys, 7: 5543–5553

Fricke B C, Alpers M, Höffner J. 2002. Daylight rejection with a new receiver for potassium resonance temperature lidars. Opt Lett, 27: 1932–1934

Le H, Liu L, Yue X, et al. 2008. The midlatitude F_2 layer during solar eclipses: Observations and modeling. J Geophys Res, 113: A08309, doi: 10.1029/2007JA013012

John M C P. 1991. The chemistry of meteoric metals in the Earth's upper atmosphere. Int Rev Phys Chem, 10: 55–106

Muller-Wodarg I C F, Aylward A D, Lockwood M. 1998. Eects of a mid-latitude Solar Eclipse on the thermosphere and ionosphere: A modelling study. Geohpys Res Lett, 25: 3787–3790

Pershin S M, Alekseev V A, Alekseeva N G, et al. 2008. Lidar monitoring of an aerosol precursor of seismic activity during the total solar eclipse of March 29, 2006. Phys Wave Phenom, 16 :159–166

Robert J S, Chester S G. 1999. Structure of the mesospheric Na layer at 40°N latitude: Seasonal and diurnal variations. J Geophys Res, 104: 11783–11798

Sharma S K, Mandal T K, Arya B C, et al. 2010. Effects of the solar eclipse on 15 January 2010 on the surface O_3, NO, NO_2, NH_3, CO mixing ratio and the meteorological par ameters, at Thiruvanathapuram, India. Ann Geophys, 28: 1199–1205

Xu J, Smith A K. 2003. Perturbations of the sodium layer: Controlled by chemistry ordynamics. Geohpys Res Lett, 30: 2056, doi: 10.1029/2003GL018040

Xu J, Smith A K. 2004. Studies of gravity wave-induced fluctuations of the sodium layer using linear andnonlinear models. J Geophys Res, 109, doi: 10.1029/2003JD004038

Xu J, Smith A K. 2005. Evaluation of processes that affect the photochemical timescale of the sodium layer. J Atmos Sol-TerrPhy, 67: 1216–1225